Canadian Centre
for Occupational
Health and Safety

Centre canadien
d'hygiène et de
sécurité au travail

EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS SUR LA SANTÉ

P89 - 27F

EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS SUR LA SANTÉ

Bhawani Pathak
Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail

Décembre 1989

CCOHS/CCHST

90-05752//

EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS SUR LA SANTÉ

Cette publication a été préparée à l'intention des comités d'hygiène et de sécurité et autres groupes ou individus désirant connaître et réduire les risques professionnels reliés à l'exposition aux rayonnements ionisants en milieu de travail.

Chaque document produit par le CCHST est soumis à une série de révisions. Dans le cadre de ce processus de révision, on demande à des représentants des gouvernements, des employeurs et des travailleurs d'examiner les versions préliminaires des documents du CCHST et de juger de leur exactitude sur le plan technique et de leur lisibilité pour l'usager.

Le CCHST s'efforce de s'assurer que l'information qu'il distribue est exacte et exhaustive. Cependant, il est entendu qu'il ne se porte pas garant que ladite information est exacte et exhaustive et il ne sera tenu responsable d'aucun dommage ni d'aucune perte subis par suite de l'utilisation d'une information inexacte ou incomplète.

Pour disséminer le plus largement possible l'information en matière d'hygiène et de sécurité au travail, le CCHST invite les usagers à copier et distribuer ses publications. Le CCHST demande, et apprécie, que la source soit indiquée. On demande aussi aux usagers d'informer le Centre du nombre d'exemplaires distribués de cette manière : s'adresser au Service des demandes de renseignements.

This publication is available in English under the title *Health Effects of Ionizing Radiation.*

NUMÉRO DU CCHST P89-27F
ISBN 0-660-92944-9
NUMÉRO DE CATALOGUE MAS CC273-2/89-27F

Date de publication : 1989

250, rue Main est
Hamilton Ontario
L8N 1H6
416-572-2981
Télécopieur 416-572-2206

CCOHS CCHST

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION	1
2.	DESCRIPTION DES RAYONNEMENTS IONISANTS	1
3.	SOURCES ET TYPES DE RAYONNEMENTS IONISANTS	2
	Rayons X	2
	Rayons gamma	2
	Particules alpha	2
	Particules bêta	3
	Neutrons	3
4.	MODES D'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS	3
	Exposition externe	3
	Exposition interne	4
5.	DOSE D'IRRADIATION	4
	Niveau de charge et niveau de charge par mois	5
6.	EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS	6
	Effets sur les cellules	6
	Effets sur la santé	6
7.	EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS SUR LES PERSONNES EXPOSÉES	6
	Effets précoces : syndrome d'irradiation aiguë	7
	Effets tardifs : cancers	7
	Effets de l'exposition interne	9
	Effets de l'exposition durant la grossesse	9
	Effets sur la fécondité	10
	Effets sur les yeux : cataractes	10
8.	EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS SUR LES DESCENDANTS DES PERSONNES EXPOSÉES	10

CCOHS/CCHST

Table des matières (suite)

9.	EFFETS COMBINÉS DE L'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS ET À D'AUTRES AGENTS PHYSIQUES ET CHIMIQUES	11
10.	RISQUES QUE COMPORTE L'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS	12
11.	DOSE MAXIMALE ADMISSIBLE	14
12.	RÉSUMÉ	17
	GLOSSAIRE	18
	LECTURES SUPPLÉMENTAIRES	20

CCOHS CCHST

1. INTRODUCTION

Les dangers possibles des rayonnements ionisants concernent les travailleurs qui utilisent ou qui fabriquent des substances radioactives, des appareils à rayons X ou certains dispositifs à haute tension. Les rapports des médias sur les effets dévastateurs de la guerre nucléaire et des accidents dans les centrales nucléaires nous rappellent constamment ces dangers. Dans un tel climat d'anxiété et de peur, il importe particulièrement que les employés et les employeurs soient au courant des faits essentiels au sujet des risques des rayonnements ionisants pour la santé.

Les rayonnements ionisants peuvent avoir des effets nocifs sur la santé des personnes exposées (effets somatiques) ou sur leurs enfants, leurs petits-enfants et les générations subséquentes (effets génétiques ou héréditaires). Les personnes exposées risquent davantage de souffrir de cancer qui peut se manifester plusieurs années après l'exposition. L'exposition des organes reproducteurs augmente les risques d'effets génétiques.

Les expositions aux rayonnements ionisants, peu importe la dose, comportent toutes un certain danger. En conséquence, on ne peut que réduire les effets au minimum et non les éliminer. La plupart des règlements concernant la protection contre les rayonnements ionisants tiennent compte de ce fait et recommandent que les doses soient maintenues au niveau le plus bas que l'on peut raisonnablement atteindre, tout en étant inférieur à la limite maximale admissible.

La présente publication donne des renseignements de base sur les effets pathologiques possibles des rayonnements ionisants. On trouvera un glossaire de termes techniques à la fin du texte. Pour plus de renseignements sur les méthodes de réduction de l'exposition des travailleurs ou sur les règlements relatifs aux limites d'exposition, communiquez avec votre comité de santé et de sécurité, la Commission de contrôle de l'énergie atomique (CCEA), le Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST) ou l'organisme provincial responsable de la sécurité des rayons X dans votre juridiction.

2. DESCRIPTION DES RAYONNEMENTS IONISANTS

Le rayonnement est de l'énergie en mouvement qui se propage dans l'air sous la forme d'une onde ou d'un flux de particules. Les rayonnements qui proviennent des appareils à rayons X ainsi que les émissions de substances radioactives produisent une matière portant une charge électrique, ou ion, lorsqu'ils entrent en contact avec l'organisme humain ou d'autres matières. Le procédé de production d'ions s'appelle ionisation et on désigne sous le terme de rayonnement ionisant le rayonnement qui produit des ions.

La chaleur, la lumière, les signaux de radio et de télévision et les fours à micro-ondes génèrent aussi des rayonnements. Cependant, dans la plupart des conditions, ces rayonnements ne produisent pas d'ions lorsqu'ils entrent en contact avec l'organisme ou une autre matière; il s'agit de rayonnements non ionisants.

3. SOURCES ET TYPES DE RAYONNEMENTS IONISANTS

Les rayonnements ionisants sont présents partout dans l'environnement naturel. Ils nous arrivent constamment du soleil ou de l'espace et d'éléments radioactifs trouvés à l'état naturel sur la terre.

Les sources artificielles de rayonnements ionisants comprennent les appareils à rayons X, les substances radioactives utilisées en médecine, en recherche et dans l'industrie, les émissions des centrales nucléaires et les appareils utilisant des faisceaux électroniques et de particules atomiques à haute tension.

Les principales sources d'exposition aux rayonnements ionisants sont les rayons X, les rayons gamma, les particules alpha, les particules bêta et les neutrons.

Rayons X

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques comme la lumière visible, mais chargées d'une énergie plus grande. Ils proviennent d'appareils à rayons X, d'accélérateurs de particules et d'autres appareils qui produisent des faisceaux électroniques à haute tension. Tous ces appareils émettent des rayons X lorsque des électrons frappent à grande vitesse une cible de métal. Les rayons X pénètrent profondément dans l'organisme humain et, par conséquent, ils sont utiles dans les techniques diagnostiques appliquées aux régions internes du corps. Les appareils à rayons X utilisés dans les hôpitaux produisent des rayons X de faible énergie qui ne peuvent pénétrer une feuille de plomb de quelques millimètres d'épaisseur ou un mur de béton de quelques centimètres d'épaisseur. Les accélérateurs de particules produisent des rayons X de forte énergie et nécessitent un épais blindage de plomb ou de béton.

Rayons gamma

Les rayons gamma sont aussi des ondes électromagnétiques émises par de nombreuses substances radioactives. Les rayons gamma sont très pénétrants et peuvent traverser le corps humain. Les murs de plomb et de béton épais réduisent l'intensité des rayons gamma.

Particules alpha

Les particules alpha sont des atomes d'hélium à charge électrique qui se déplacent à très grande vitesse (plusieurs kilomètres par seconde). Les isotopes radioactifs d'éléments lourds comme l'uranium, le thorium, le polonium

et l'américium émettent des particules alpha. À cause de leur taille relativement grande et de leur charge électrique, les particules alpha ont un très faible pouvoir de pénétration. La couche extérieure de la peau ou une feuille de papier peuvent arrêter les particules alpha.

Particules bêta

Les particules bêta sont des particules à charge électrique extrêmement petites appelées aussi électrons. Un électron est environ 7 000 fois plus léger qu'une particule bêta. Les particules bêta peuvent se déplacer à une vitesse proche de celle de la lumière. Leur pouvoir de pénétration est plus grand que celui des particules alpha, mais très inférieur à celui des rayons gamma et des rayons X. Un blindage bien conçu peut arrêter les particules bêta.

Neutrons

Les neutrons sont des particules atomiques électriquement neutres. Un neutron pèse la quart du poids d'une particule alpha et peut pénétrer profondément dans l'organisme. Les réacteurs nucléaires et les accélérateurs de particules produisent des neutrons. Une épaisse couche de plastique, d'eau ou d'autres matières légères ralentit les neutrons. Le cadmium et certains autres éléments absorbent efficacement les neutrons lents.

4. MODES D'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

Nous sommes tous constamment exposés au rayonnement ionisant naturel qui provient des rayons cosmiques, des atomes radioactifs dans la croûte terrestre et des substances radioactives qui existent à l'état naturel dans les aliments et l'eau. La quantité de ce rayonnement ionisant naturel varie selon l'endroit et le temps. Les niveaux de rayonnement naturel exposent continuellement la population générale à une dose annuelle de deux à trois millisieverts (mSv).

En milieu de travail, il peut se produire deux types d'exposition aux rayonnements : l'exposition externe et l'exposition interne. La première est causée par des sources de rayonnements situées dans le milieu immédiat. La dernière est causée par des produits radioactifs introduits dans l'organisme par voies respiratoires ou digestives ou par la contamination de blessures et de coupures.

Exposition externe

Les rayons gamma et les rayons X sont le principal problème puisqu'ils peuvent pénétrer profondément dans le corps humain. Les tissus de l'organisme absorbent les radiations qui causent les lésions.

Dans certaines situations, les particules bêta peuvent présenter un risque d'irradiation externe. Le risque est plus grand lorsque les yeux sont exposés ou lorsque le produit radioactif est déposé sur la peau.

Les particules bêta peuvent être indirectement responsables d'une exposition externe. Lorsque ces particules ralentissent à l'intérieur de métaux comme le tantale ou le tungstène, elles produisent des rayons X appelés rayonnements de freinage qui comportent un risque d'irradiation externe, tout comme les rayons X et les rayons gamma.

Les particules alpha sont les moins pénétrantes. Quelques centimètres d'air et moins qu'une fraction d'un millimètre d'épaisseur d'une autre matière peuvent les absorber.

Les neutrons présentent un risque d'irradiation externe parce qu'ils peuvent pénétrer profondément dans l'organisme.

Exposition interne

L'exposition interne est causée par un produit radioactif introduit dans l'organisme par voies digestives ou respiratoires ou absorbé par la peau ou des coupures et des blessures. L'organisme finit par excréter ces substances étrangères principalement par les urines et les selles. Le temps nécessaire pour éliminer complètement la substance radioactive varie considérablement. Certains produits radioactifs peuvent rester dans l'organisme pendant plusieurs années tandis que d'autres n'y séjournent que pendant quelques heures. La dose d'irradiation continue de s'accumuler jusqu'à ce que la radioactivité disparaisse ou que l'organisme ait éliminé le produit radioactif.

À cause de leur pouvoir de pénétration extrêmement faible, les rayonnements alpha présentent le risque maximal d'irradiation interne. Une mince couche (moins qu'un millimètre d'épaisseur) de tissus autour du point d'émission absorbe les particules alpha causant une lésion radio-induite localisée.

Les particules bêta et les rayons gamma produits à la suite d'une irradiation interne causent des lésions radio-induites à un volume tissulaire plus grand.

5. DOSE D'IRRADIATION

Les rayonnements ionisants qui entrent en contact avec le corps transmettent leur énergie au tissu corporel. La quantité d'énergie absorbée par poids unitaire de l'organe ou du tissu du corps s'appelle dose absorbée. Elle est exprimée en unités de gray (Gy). Le gray est une unité de dose absorbée qui correspond à une énergie de un joule par kilogramme de matière ou de tissu. Le rad est l'ancienne unité de mesure de dose absorbée. Un gray équivaut à 100 rads.

Dans certaines études, on rapporte les expositions aux rayons X et aux rayons gamma en unités de roentgen (R). Il s'agit de la quantité d'ionisation dans l'air. Un roentgen de radiations gamma ou X produit une dose tissulaire d'environ un rad (0,01 Gy).

À dose égale, tous les types de rayonnements ne présentent pas le même danger. Pour une dose absorbée donnée, les particules alpha sont plus nocives que les rayonnements bêta, gamma et X. Pour tenir compte de cette divergence, nous exprimons la dose d'irradiation en équivalent de dose ou simplement dose en

unités de sievert (Sv). La dose en Sv est égale à la dose absorbée multipliée par un facteur de qualité (voir le tableau 1). Une dose de 1 Sv produit un effet biologique constant peu importe le type de rayonnement. Le rem est l'ancienne unité de l'équivalent de dose.

Dose en Sv = dose absorbée en Gy x facteur de qualité (FQ)
Dose en rems = dose en rads x FQ
1 Sv = 100 rems
1 rem = 10 mSv (millisievert = un millième de 1 Sv)

Tableau 1 - Facteurs de qualité

Rayonnement	Facteur de qualité
Rayons gamma et X	1
Particules bêta	1
Neutrons lents	2
Neutrons rapides	10
Particules alpha	20

Le tableau 2 présente les unités SI (unités du système international) avec leurs symboles, les unités non SI correspondantes et les coefficients de conversion.

Tableau 2 - Unités de radioactivité et de dose d'irradiation

Quantité	Unité et symbole SI	Unité non SI	Coefficient de conversion
Radioactivité	becquerel, Bq	curie, Ci	1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq (37 GBq)
Dose absorbée	gray, Gy	rad	1 rad = 0,01 Gy
Dose (équivalent de dose)	sievert, Sv	rem	1 rem = 0,01 Sv

Niveau de charge et niveau de charge par mois

Dans les mines d'uranium souterraines, comme dans certaines autres mines, l'exposition aux rayonnements est principalement causée par un gaz radioactif, le radon, et ses produits de décomposition de courte période radioactive

appelés produits de filiation du radon. Les produits de filiation du radon pénètrent dans l'organisme par la voie respiratoire. Le niveau de charge (NC) est l'unité de mesure de la concentration des produits de filiation du radon dans l'air. On mesure ainsi la concentration de l'énergie potentielle de particules alpha par litre d'air. L'exposition du travailleur aux produits de filiation du radon est exprimée en unités de niveau de charge par mois (NCM). Un NCM est équivalent à l'exposition à 1 NC pendant 170 heures. Pour plus de renseignements sur le radon, consultez la publication du CCHST (P89-3F), *Les émanations de radon dans les immeubles.*

6. EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS

Effets sur les cellules

Le corps humain, comme tous les organismes vivants, est formé de petits éléments constituants appelés cellules. Les cellules, à l'exception des cellules du cerveau, peuvent se reproduire exactement (division cellulaire) pour remplacer les cellules qui meurent. La durée de vie des cellules humaines varie de quelques heures à plusieurs années. Les rayonnements ionisants ont la propriété d'altérer ces cellules de nombreuses façons. Ils peuvent :

- causer la mort précoce des cellules
- empêcher ou retarder la division cellulaire
- modifier de façon permanente les propriétés des cellules et transmettre ces modifications aux cellules-filles

La probabilité de lésion cellulaire est faible aux doses professionnelles typiques de rayonnements ionisants.

Plusieurs expositions chimiques et biologiques peuvent également provoquer des lésions cellulaires. Si les processus biologiques normaux ne peuvent réparer la lésion, il peut en résulter divers effets sur la santé.

Effets sur la santé

Nos connaissances actuelles sur les effets pathologiques des rayonnements ionisants découlent d'études sur les taux de maladies et de décès parmi les groupes suivants :

- les survivants des explosions atomiques
- les patients qui ont reçu de fortes doses de rayonnements pour des raisons médicales
- les groupes professionnels exposés : travailleurs qui peignent des cadrans avec une peinture renfermant du radium, radiologues, travailleurs des mines d'uranium et d'autres mines
- les animaux de laboratoire

La plupart des données ci-dessus se rapportent à des doses beaucoup plus élevées que les doses professionnelles typiques. Ces données servent à évaluer le risque (la probabilité) que la dose professionnelle entraîne des effets pathologiques à long terme.

Le risque de maladies radio-induites dépend de la dose d'irradiation cumulée, qui est égale à la dose annuelle moyenne multipliée par les années d'exposition.

7. EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS SUR LES PERSONNES EXPOSÉES

Les rayonnements ionisants causent deux types d'effets sur la santé des personnes exposées :

- les effets précoces, ou syndrome d'irradiation aiguë, qui se produisent quelques heures à quelques semaines après l'exposition
- les effets tardifs qui se produisent 5 à 30 ans ou plus après l'exposition

Effets précoces : syndrome d'irradiation aiguë

Les effets précoces se manifestent lorsque l'ensemble du corps ou un organe particulier reçoit une forte dose d'irradiation (1 Sv ou plus) pendant une courte période. Les symptômes sont des affections de la peau, de la moelle osseuse, du système digestif et du système neuromusculaire. La gravité des effets dépend de la dose d'irradiation totale, de la vitesse à laquelle la dose est administrée (débit de dose), du genre de rayonnement et de la partie du corps exposée. Les doses élevées peuvent entraîner la mort 10 à 15 jours après l'exposition. Une très forte dose administrée au système nerveux central peut entraîner la mort en quelques heures.

Les effets aigus ne se manifestent pas en deçà d'une certaine dose minimale appelée dose seuil, qui dépend de la nature de l'effet et du tissu touché. Les doses d'irradiation professionnelle sont très petites comparées aux doses seuils pour les effets aigus. Sauf dans le cas d'un accident grave, l'exposition professionnelle ne comporte pratiquement pas de risques d'effets aigus.

Effets tardifs : cancers

Les effets tardifs qui apparaissent plusieurs années après l'exposition comprennent des risques accrus de leucémie et de cancer de divers organes. Le laps de temps entre l'exposition et la manifestation du cancer s'appelle la période de latence. Dans le cas de la leucémie et du cancer des os, cette période est de deux à quatre ans, et 10 ans ou plus pour d'autres types de cancer. Le risque accru de leucémie et de cancer des os existe toujours 25 à 30 ans après l'exposition, tandis que pour la plupart des autres cancers, ce risque peut persister plus longtemps.

Les effets tardifs se manifestent de façon aléatoire. Par conséquent, il est impossible de prédire si une personne exposée sera atteinte ou non d'un cancer. Même si quelques personnes seulement seront atteintes de cancer, le risque existe pour toutes celles qui ont été exposées.

8/Rayonnements ionisants

Les rayonnements ionisants ne sont pas la seule cause de cancer. Dans la population en général, certaines personnes sont atteintes d'un cancer dont les causes sont inconnues. Le cancer est responsable de près de 20 pour cent de tous les décès parmi les personnes exposées. Lorsqu'une personne exposée développe un cancer, il est impossible de déterminer si les rayonnements en sont la seule cause. La fréquence du cancer semble plus élevée chez les personnes exposées aux rayonnements que chez les autres.

On n'a pas établi avec certitude le rapport exact entre la dose d'irradiation et la manifestation du cancer, particulièrement aux faibles doses et aux faibles débits de doses caractéristiques des expositions professionnelles. La Commission internationale de protection radiologique a estimé que le facteur de risque de cancers mortels dû à une dose d'irradiation est de un pour 100 personnes exposées par dose de Sv. La dose maximale admissible est de 50 mSv. Si une personne recevait 50 mSv chaque année pendant 20 ans, sa dose cumulée serait de 1 Sv.

On croit généralement que le taux de fréquence du cancer dans une population augmente de façon linéaire avec la dose d'irradiation. Par exemple, si un certain nombre de cas de cancer apparaissent à cause d'une dose donnée, le nombre de cas de cancer doublera si la dose est doublée. De plus, on suppose généralement qu'il n'existe pas de dose d'irradiation absolument sûre (dose seuil) en deçà de laquelle le risque de cancer est inexistant. L'absence de seuil laisse supposer que n'importe quelle dose, peu importe son importance, comporte un certain risque. Par exemple, le facteur de risque d'une dose d'irradiation de 0,1 mSv est de un sur un million environ.

Les rayonnements ionisants peuvent provoquer un cancer dans la plupart des organes de l'organisme. La sensibilité des organes varie.

Organes dont la sensibilité est élevée

- les cellules sanguinoformatrices
- le sein chez la femme
- la thyroïde (particulièrement chez la femme)
- les poumons
- le système digestif

Organes de sensibilité incertaine

- le larynx
- les sinus de la face
- les ovaires
- les tissus conjonctifs

Organes dont la sensibilité est modérée ou faible

- le pharynx
- le foie
- les voies biliaires
- le pancréas
- les ganglions lymphatiques
- les reins

- la vessie
- le cerveau
- le système nerveux
- les glandes salivaires
- les os et la peau

On n'a signalé aucun cancer radio-induit de la prostate, du col utérin, de l'utérus et des testicules. À mesure que de nouvelles données s'accumulent, les connaissances concernant la sensibilité des divers organes peuvent changer.

Effets de l'exposition interne

Les substances radioactives qui pénètrent dans l'organisme ont tendance à s'accumuler principalement dans un organe particulier. Si la substance radioactive absorbée par le corps émet des particules alpha, toute la dose d'irradiation est concentrée dans l'organe qui contient l'émetteur alpha. Un émetteur gamma absorbé à l'intérieur de l'organisme affecte un volume plus grand de tissus ou d'organes.

Le tissu ou l'organe qui absorbe les rayonnements est appelé tissu cible ou organe cible. Le poumon est le principal organe cible exposé dans les cas d'inhalation d'émetteurs alpha ou bêta insolubles. Le tableau 3 présente d'autres exemples de substances radioactives et d'organes cibles.

L'organe qui reçoit la dose maximale est généralement le plus exposé aux risques. Par exemple, les travailleurs des mines d'uranium souterraines inhalent des produits de filiation du radon qui émettent des particules alpha dans les poumons. En conséquence, le cancer du poumon est la principale maladie radio-induite parmi les travailleurs des mines souterraines.

Tableau 3 - Exemples d'organes cibles pour certaines substances radioactives

Substance radioactive	Organes cibles
Plutonium	ovaires, testicules, surface osseuse, poumons, foie, parois du gros intestin
Uranium	reins, moelle osseuse, surface osseuse, parois du gros intestin
Radium	ovaires, testicules, moelle osseuse, poumons, parois de la partie inférieure du gros intestin
Iode	thyroïde, poumons, parois de l'estomac

Effets de l'exposition durant la grossesse

Voici les risques d'exposition d'un foetus en cours de développement :

- irradiation externe qui pénètre les tissus maternels
- substance radioactive qui atteint le foetus par la voie digestive, respiratoire ou intraveineuse chez la mère

L'exposition de l'embryon humain à des rayonnements au début de son développement peut entraîner sa mort ou un avortement spontané.

Le foetus est extrêmement sensible aux rayonnements. Des malformations peuvent se produire, particulièrement s'il est exposé à de très fortes doses durant la période du développement de l'architecture de ses organes. Cette période s'étend de la deuxième à la neuvième semaine de la grossesse. Des chercheurs croient qu'il existe une dose seuil au-dessous de laquelle les rayonnements n'affectent pas le foetus en cours de développement. On ne connaît pas exactement la valeur de cette dose seuil, mais il est probable qu'une dose totale inférieure à 0,01 Sv (1 rad) n'aurait pas d'effets de grande envergure.

L'exposition du foetus aux rayonnements peut causer divers types d'anomalies chez le nouveau-né, dont une croissance réduite de la tête, une arriération mentale, un retard général de croissance, une déformation de divers organes et des anomalies génétiques. On a observé ces effets seulement à des doses très élevées. Certains de ces effets peuvent se manifester à la naissance, tandis que d'autres peuvent apparaître plus tard durant l'enfance.

Effets sur la fécondité

Il n'existe pas de données sur la stérilité due aux rayonnements pour l'exposition à long terme à de faibles doses. Une personne dont les organes reproducteurs reçoivent une dose d'irradiation très élevée (100 fois la dose maximale admissible annuelle) pendant une très courte période peut souffrir de stérilité. La dose stérilisatrice chez l'homme est probablement beaucoup plus élevée que 4 Gy (400 rads). Chez les femmes, des doses aiguës de 3 à 4 Gy (300 à 400 rads), administrées en deux ou trois fois, peuvent causer une stérilité permanente. Cependant, cet effet dépend en partie de l'âge. L'exposition professionnelle à des doses inférieures à la limite maximale admissible n'entraînera vraisemblablement pas la stérilité.

Effets sur les yeux : cataractes

Selon les résultats d'expériences effectuées sur des animaux, pour causer chez l'être humain des troubles importants de la vision, il faudrait une dose de 2 à 5 Gy (200 à 500 rads) au moins, et une dose plus élevée si l'exposition est échelonnée. On n'a démontré aucun cas de cataracte à la suite d'expositions à long terme du cristallin humain à de faibles débits de doses.

8. EFFETS DES RAYONNEMENTS IONISANTS SUR LES DESCENDANTS DES PERSONNES EXPOSÉES

Les effets génétiques des rayonnements ionisants n'ont pas été observés chez l'être humain. L'expérience animale montre que l'exposition aux rayonnements peut avoir des répercussions génétiques ou héréditaires. La fréquence des troubles génétiques dépend de la dose d'irradiation aux ovaires ou aux testicules et non de l'irradiation de l'ensemble du corps. On appelle troubles génétiques dominants les troubles qui apparaissent chez les enfants des personnes exposées; ceux qui se manifestent chez les générations subséquentes des personnes exposées sont qualifiés de troubles récessifs.

L'être humain transmet ses caractéristiques essentielles d'une génération à l'autre dans les chromosomes situés dans les cellules reproductrices. Les chromosomes transmettent l'information génétique au moyen des gènes. Les gènes de la mère et du père s'unissent au moment de la conception. Tout au long de la vie, chaque division cellulaire reproduit presque toujours fidèlement les chromosomes. Plusieurs agents physiques et chimiques, y compris les rayonnements ionisants, peuvent causer des changements ou des mutations dans les gènes. Les mutations peuvent être à l'origine d'une grande variété de maladies et d'anomalies, y compris des doigts et des orteils supplémentaires, le nanisme, l'arriération mentale, plusieurs genres d'anémie, le cancer de l'oeil, la cécité et la mort durant les premières années de la vie. La plupart de ces maladies se manifestent rarement.

Les changements dans les chromosomes humains peuvent survenir plus fréquemment parmi les personnes exposées à de fortes doses d'irradiation. La fausse couche est la conséquence la plus probable des changements chromosomiques; elle se produit souvent si tôt qu'on ne peut la déceler. L'une des maladies que causent les changements chromosomiques et qui a le plus fait l'objet d'études est le syndrome de Down, aussi appelé mongolisme. Des études épidémiologiques sur le lien entre l'exposition aux rayonnements et le syndrome de Down ont donné des résultats contradictoires.

Dans la population en général, près de 10 pour cent de tous les enfants naissent avec un certain degré d'anomalie héréditaire. Les rayonnements ionisants et certaines substances chimiques nocives peuvent augmenter la fréquence des anomalies génétiques. La Commission internationale de protection radiologique a évalué le facteur de risque moyen d'effets héréditaires subis par les deux premières générations à près de quatre cas par 1 000 personnes exposées par dose en Sv.

En plus des anomalies et des maladies, les changements génétiques peuvent prédisposer les personnes à des troubles comme le diabète, la schizophrénie, le cancer et l'arriération mentale.

9. EFFETS COMBINÉS DE L'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS ET À D'AUTRES AGENTS PHYSIQUES ET CHIMIQUES

On peut partager les effets combinés des rayonnements ionisants et d'autres agents physiques et chimiques en trois catégories :

- Effets synergiques - Le risque lié à une exposition combinée est plus grand que la somme des risques individuels.
- Effets sans action réciproque - Le risque lié à une exposition combinée est égal à la somme des risques individuels.
- Effets antagonistes - Le risque lié à l'exposition combinée est inférieur à la somme des risques individuels.

Selon des études sur les décès attribuables au cancer pulmonaire parmi des mineurs d'uranium, les fumeurs sont plus exposés à ce type de cancer que les non-fumeurs. L'action combinée du tabac et de la dose d'irradiation est plus forte que la somme des risques individuels liés au tabac et à la dose d'irradiation.

Le document UNSCEAR 82 (voir la rubrique «Lectures supplémentaires») présente une analyse complète des effets biologiques de l'action combinée des rayonnements ionisants et d'autres agents physiques, chimiques et biologiques. Les travailleurs de l'industrie de l'électronique et de la radiotechnique peuvent être exposés à l'action synergique des rayonnements ionisants et des micro-ondes. Les effets de cette action comprennent entre autres des troubles du système nerveux et un sentiment d'inconfort.

On a signalé un nombre de cas exceptionnellement élevé de troubles du système nerveux parmi des travailleurs d'usines de métallurgie qui ont été exposés à des rayonnements ionisants et à des hautes températures. Les preuves ne sont pas suffisantes pour démontrer qu'il existe une synergie entre les effets de la haute température et des rayonnements ionisants.

En ce qui concerne l'action combinée des basses températures et des rayonnements ionisants, les données sont insuffisantes pour conclure aussi bien aux effets synergiques qu'aux effets antagonistes. Nous n'avons pas trouvé d'études démontrant l'existence d'une action synergique entre les rayonnements et un autre agent physique quelconque comme la haute altitude, le stress physique, une défectuosité mécanique, le champ magnétique ou les ultrasons.

Les données sur la synergie entre les effets des rayonnements et des poussières et substances chimiques cancérogènes sont peu concluantes.

10. RISQUES QUE COMPORTE L'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

Le risque sous-entend la probabilité d'un danger ou d'une blessure. Le risque de cancer est plus élevé pour les personnes exposées aux rayonnements. Si nous répartissons le nombre de décès attribuables au cancer survenus au cours d'une période suffisamment longue (plusieurs années) en deux grands groupes de personnes (plusieurs milliers) -- un groupe exposé à un niveau élevé de rayonnements ionisants et un groupe non exposé -- les décès liés au cancer seront plus nombreux dans le premier groupe que dans le deuxième. Le nombre de cancers en plus dépend de la dose totale accumulée reçue par chaque personne exposée et du nombre de personnes exposées, ainsi que de facteurs comme l'âge, le sexe, la durée du suivi et l'usage du tabac. Comme il est difficile de définir de façon précise tous ces facteurs, les évaluations du risque de cancer radio-induit varient d'une étude à l'autre. En matière de radioprotection, la Commission internationale de protection radiologique (CIPR 26) a estimé que le facteur de risque de décès lié à des cancers radio-induits est de un cas environ par 100 personnes exposées, par dose d'irradiation corporelle totale en Sv. Autrement dit, pour 1 000 personnes qui reçoivent une irradiation corporelle totale de 50 mSv chaque année, pendant 20 ans, l'excès de mortalité par cancer serait de l'ordre de 10 décès. Dans la population en général, près de 20 pour cent de tous les décès sont attribuables au cancer.

Dans certaines situations, surtout lorsque la substance radioactive est introduite à l'intérieur de l'organisme, un organe ou un tissu particulier reçoit la plus forte dose d'irradiation. La CIPR recommande une méthode pour calculer un équivalent de dose pour l'ensemble du corps à partir de la dose reçue par un organe ou un tissu particulier.

Équivalent de dose pour l'ensemble du corps = dose tissulaire en Sv x facteur de pondération (W_T)

Les facteurs de pondération tiennent compte du risque de cancer mortel radio-induit pour différents organes (voir le tableau 4).

Tableau 4 - Facteurs de pondération (W_T) et facteurs de risque pour des tissus et des organes sujets à un cancer radio-induit

Tissu	Risque, $*Sv^{-1}$	Commentaires	W_T
Ovaires, testicules	$4,0 \times 10^{-3}$	Risque génétique pour les deux premières générations	0,25
Sein	$2,5 \times 10^{-3}$	Moyenne pour tous les âges et les deux sexes	0,15
Moelle osseuse rouge	$2,0 \times 10^{-3}$	Leucémie	0,12
Poumon	$2,0 \times 10^{-3}$	Cancer	0,12
Glande thyroïde	$5,0 \times 10^{-4}$	Cancer	0,03
Surface osseuse	$5,0 \times 10^{-4}$	Ostéosarcome	0,03
Autres	$5,0 \times 10^{-3}$	Cancer, en supposant qu'aucun tissu simple n'intervient pour plus de 1/5 de ce total	0,30
			—
Risque total	$1,65 \times 10^{-2}$	Total	1,00

* Ces facteurs de risque seront rajustés en fonction des nouvelles données recueillies.

Par exemple, une dose de 1 Sv administrée aux poumons égale une dose de 0,12 Sv administrée à l'ensemble du corps.

Les estimations des risques d'exposition au cancer radio-induit sont tirées d'études faites auprès de personnes exposées à de fortes doses et à un débit de dose élevé. Par conséquent, les taux de maladies prévus parmi des groupes de travailleurs exposés à de faibles doses ne sont que des approximations.

11. DOSE MAXIMALE ADMISSIBLE

Au Canada, la Commission de contrôle de l'énergie atomique (CCEA) est chargée d'établir les doses maximales admissibles pour l'exposition aux rayonnements ionisants émis par des substances radioactives et les installations nucléaires. L'établissement des doses maximales admissibles pour les rayons X provenant d'appareils à rayons X et d'autres sources électriques relève des gouvernements provinciaux. Les tableaux 5 et 6 présentent un résumé des doses admissibles établies par la CCEA.

Les rayonnements sont considérés nocifs, peu importe la dose, et on devrait les éviter dans la mesure du possible. La CIPR recommande de maintenir toutes les expositions au niveau de risque le plus bas que l'on peut raisonnablement atteindre, en deçà de la limite réglementaire, tout en tenant compte des facteurs économiques et sociaux.

Il est considérablement plus difficile d'établir les limites admissibles concernant l'absorption de substances radioactives. Pour chaque substance radioactive, il faut tenir compte séparément des facteurs physiques, chimiques et biologiques. La CIPR propose des limites dans sa publication 30 intitulée *Limits for Intake of Radionuclides by Workers.*

Tableau 5 - Doses maximales admissibles (en millisieverts)* pour les rayonnements ionisants au Canada [1-3]

Organe ou tissu	Travailleurs sous rayonnements[2] mSv par trimestre	mSv par année	Autres personnes mSv par année
Ensemble du corps, testicules, ovaires, moelle osseuse	30[4]	50[4]	5
Os, peau, thyroïde	150	300	30[5]
Tout tissu des mains, des avant-bras, des pieds et des chevilles	380	750	75
Poumons (6) et autres organes ou tissus individuels	80	150	15

* 1 mSv = 0,1 rem

Tableau 6 - Doses maximales admissibles de l'exposition aux produits de filiation du radon [1,2,6]

Travailleurs sous rayonnements NCM par trimestre	NCM par année	Autres personnes NCM par année[7]
2	4	0,4

CCOHS/CCHST

Remarques concernant les tableaux 5 et 6

1) Les doses et les expositions maximales admissibles présentées dans le tableau 5 ne s'appliquent pas aux rayonnements ionisants :
   a) administrés à un malade pour des raisons médicales par un médecin autorisé
   b) reçus par une personne appliquant des mesures d'urgence entreprises pour protéger la vie humaine

2) La Commission de contrôle de l'énergie atomique peut, dans des circonstances extraordinaires, autoriser des doses uniques ou cumulatives atteignant le double des doses ou des expositions maximales admissibles par année pour les travailleurs exposés aux rayonnements ionisants. Cette variance ne sera pas permise :
   a) s'il existe des solutions de rechange appropriées;
   b) dans les cas d'irradiation de l'ensemble du corps ou de l'abdomen de femmes en âge de procréer;
   c) dans les cas d'irradiation de l'ensemble du corps, des gonades ou de la moelle osseuse si la dose moyenne reçue de l'âge de 18 ans jusqu'à et y compris l'année en cours dépasse 50 mSv par année.

3) En déterminant la dose, il faut inclure l'apport de sources de rayonnements ionisants tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'organisme.

4) Dans le cas d'une travailleuse sous rayonnements enceinte, la dose reçue par son abdomen ne doit pas dépasser un total de 10 mSv cumulés à un débit maximal de 0,6 mSv par deux semaines, après que l'employeur aura été informé de sa grossesse.

5) La dose administrée à la thyroïde d'une personne âgée de moins de 16 ans ne doit pas dépasser 15 mSv par année.

6) Pour les expositions aux produits de filiation du radon, les expositions maximales admissibles (en niveau de charge par mois) s'appliquent au lieu des doses maximales admissibles pour les poumons (en mSv).

7) La valeur NCM ne convient pas aux expositions à la maison ou dans un milieu autre que celui du travail. Dans ces situations, la concentration maximale admissible de produits de filiation du radon liée au fonctionnement d'une installation nucléaire ne doit pas dépasser 0,02 NC en moyenne, par année.

Le Règlement sur le contrôle de l'énergie atomique fait présentement l'objet de révision (voir la rubrique «Lectures supplémentaires»). Les tableaux 7 et 8 donnent les doses maximales admissibles proposées. La dose annuelle maximale (professionnelle) proposée pour l'exposition aux produits de filiation du radon correspond à un niveau de charge à l'heure de 800 (4,7 NCM environ).

Tableau 7 - Doses maximales admissibles proposées

Groupe exposé	Durée de l'exposition	Dose maximale admissible (en millisieverts)
Travailleur sous rayonnements	1/4 d'année dosimétrique	30
Travailleur sous rayonnements	Une année dosimétrique	50
Personne autre qu'un travailleur sous rayonnements	Une année dosimétrique	5

Tableau 8 - Doses maximales admissibles proposées

Tissus ou organe	Groupe exposé	Durée de l'exposition	Dose maximale admissible (en millisieverts)
Cristallin	Travailleur sous rayonnements	1/4 d'année dosimétrique	80
Cristallin	Travailleur sous rayonnements	Une année dosimétrique	150
Autre organe ou tissu	Travailleur sous rayonnements	1/4 d'année dosimétrique	300
Autre organe ou tissu	Travailleur sous rayonnements	Une année dosimétrique	500
Embryon ou foetus	Travailleur sous rayonnements	Période bimensuelle	0,6
Embryon ou foetus	Travailleur sous rayonnements	Reste de la grossesse	10
Organe ou tissu quelconque	Personne autre qu'un travailleur sous rayonnements	Une année dosimétrique	50

CCOHS/CCHST

12. RÉSUMÉ

Les rayonnements ionisants sont de l'énergie qui se propage dans l'air, sous la forme d'ondes électromagnétiques ou de flux rapide de particules. En milieu de travail, les sources de rayonnements ionisants sont les substances radioactives, les centrales nucléaires, les appareils à rayons X et les dispositifs nucléaires utilisés en médecine, en recherche et dans l'industrie. Les genres de rayonnements courants sont les particules alpha, les particules bêta et les rayons gamma.

Les particules alpha ont un très faible pouvoir de pénétration et sont dangereuses seulement lorsque la substance radioactive est introduite à l'intérieur du corps. Les particules bêta sont plus pénétrantes que les particules alpha et peuvent pénétrer dans les tissus externes et causer des lésions à la peau et aux yeux. Le pouvoir de pénétration des rayons gamma est très puissant; ils peuvent provoquer des affections radio-induites de l'ensemble du corps. La probabilité de ces affections dépend de la dose d'irradiation cumulée.

Les principaux effets pathologiques des rayonnements ionisants sont le cancer chez les personnes exposées et les troubles génétiques chez les enfants, les petits-enfants et les générations subséquentes.

Le foetus est extrêmement sensible aux anomalies radio-induites. À fortes doses, les rayonnements peuvent provoquer des cataractes dans les yeux. On ne possède pas de preuve solide que les rayonnements ionisants causent le vieillissement prématuré. Dans les cas d'exposition professionnelle, la stérilité due aux rayonnements est très peu probable. Les données sur l'action combinée des rayonnements ionisants et d'autres agents physiques et chimiques cancérogènes ne sont pas concluantes.

GLOSSAIRE

Absorption : procédé selon lequel l'interaction de la matière réduit la force de pénétration des particules ou des rayons gamma dans cette matière.

Particule alpha : noyau de l'atome d'hélium portant une charge positive; ces particules sont souvent appelées rayons alpha.

Atome : la plus petite particule d'un élément.

Rayonnement ionisant naturel : rayonnement qui existe à l'état naturel dans l'environnement.

Particules bêta : électrons émis par certains noyaux radioactifs; souvent appelés rayons bêta.

Demi-vie biologique : temps qu'il faut à l'organisme ou à un organe pour éliminer la moitié d'une substance donnée.

Moelle osseuse : substance molle qui remplit la partie centrale de nombreux os. Elle joue un rôle essentiel dans la production des globules sanguins.

Chromosome : élément du noyau cellulaire en forme de bâtonnet qui contient les gènes.

Rayons cosmiques : rayonnements ionisants de grande énergie et d'origine cosmique qui pénètre dans l'atmosphère de la terre.

Décomposition : procédé spontané où les atomes radioactifs se désintègrent en émettant des rayons alpha, bêta ou gamma.

Dose : quantité (totale ou cumulée) d'irradiation par poids unitaire.

Débit de dose : dose administrée par unité de temps.

Électron : particule possédant une charge d'électricité négative et une masse qui correspond à 1/1837 de celle de l'atome d'hydrogène.

Rayon gamma (rayonnement gamma) : rayonnement électromagnétique de forte intensité émis par certaines substances radioactives. Les rayons gamma sont très pénétrants. Les matériaux denses comme le plomb conviennent pour bloquer les rayons gamma.

Gènes : subunités de chromosomes qui déterminent les caractéristiques héréditaires.

Effets génétiques : mutations ou autres changements produits par l'irradiation des cellules reproductrices.

Gonades : organes reproducteurs de l'homme (testicules) et de la femme (ovaires).

Gray (Gy) : unité de dose de radiation. Un gray égale l'énergie d'un joule introduite par kilogramme de poids corporel ou de poids de l'organe.

Demi-vie : temps que met la moitié des atomes radioactifs d'une substance donnée pour se décomposer. Ce temps dépend de l'élément et est indépendant de la quantité de matière radioactive.

CIPR : Commission internationale de protection radiologique

Ion : un atome qui a trop ou pas assez d'électrons et qui devient donc porteur d'une charge électrique.

Ionisation : phénomène par lequel un atome neutre perd un ou plusieurs électrons.

Rayonnement ionisant : tout rayonnement capable de déplacer les électrons d'atomes ou de molécules pour produire des ions. Il s'agit entre autres des rayonnements électromagnétiques (rayons X, rayons gamma) et particulaires (alpha, bêta).

Période de latence : laps de temps qui s'écoule entre l'exposition et la manifestation des troubles radio-induits.

Leucémie : maladie du sang caractérisée par la production anormale de leucocytes.

Mutation : changement que subit un gène à la suite d'une exposition à des rayonnements ou à d'autres agents et qui modifie les caractéristiques des descendants.

Radioactivité naturelle : radioactivité associée à certains éléments qui se trouvent dans la nature.

Neutron : particule nucléaire électriquement neutre ayant une masse semblable à celle de l'atome d'hydrogène.

Facteur de qualité (FQ) : facteur de multiplication utilisé pour calculer la dose biologique active à partir de la dose d'irradiation absorbée. Le facteur de qualité est de 1 pour les rayons gamma, bêta et X, de 10 pour les neutrons et de 20 pour les rayons alpha.

Rad : abréviation de l'anglais pour «dose absorbée de rayonnements». C'est l'ancienne unité de mesure de la dose absorbée qui correspond à 100 ergs d'énergie introduite par gramme de tissu.

Rem : sigle correspondant à l'anglais pour «équivalent-homme de Roentgen». Ancienne unité de mesure qui correspond à la dose absorbée en rads multipliée par un facteur de qualité.

Roentgen : ancienne unité d'exposition définie par la quantité d'ions produits dans des conditions précises.

SI : Système international. Système d'unités adopté à l'échelle internationale.

Sievert : unité SI d'équivalent de dose égale à la dose absorbée en grays multipliée par un facteur de qualité.

Rayons X : rayonnements ionisants ayant une très grande force de pénétration et émis sous forme d'ondes électromagnétiques.

LECTURES SUPPLÉMENTAIRES

Beebe, G.W. Ionizing radiation and health. American Scientist. Vol. 70 (January-February 1982) p. 35-44.

Ionizing radiation: sources and biological effects: United Nations Committee on the Effects of Atomic Radiation 1982 (UNSCEAR 82) report to the General Assembly, with annexes. New York: United Nations, 1982.

Interagency Task Force on the Health Effects of Ionizing Radiation: report of the work group on science. Washington, D.C.: U.S. Department of Health, Education and Welfare, 1979.

Limits for intakes of radionuclides by workers. (Annals of the ICRP, vol. 2, no. 3/4). Oxford: Pergamon Press, 1979.

Little, J.B. Environmental hazards: ionizing radiation. New England Journal of Medicine. Vol. 275 (Oct. 27, 1966) p. 929-938.

National Research Council, Committee on Federal Research on the Biological and Health Effects of Ionizing Radiation. Federal research on the biological and health effects of ionizing radiation. Washington, D.C.: National Academy Press, 1981.

National Research Council, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations. The effects on populations of exposure to low levels of ionizing radiations. Washington, D.C.: National Academy Press, 1980.

Projets de remaniement du Règlement sur le contrôle de l'énergie atomique. (Document de consultation C-83). Ottawa : Commission de contrôle de l'énergie atomique, 1986.

Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (ICRP). (Annals of the ICRP, vol. 1, no. 3). Oxford: Pergamon Press, 1977.

Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1977 (UNSCEAR 77) report to the General Assembly, with annexes. New York: United Nations, 1977.

What the general practitioner (MD) should know about medical handling of overexposed individuals. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 1986.